

З. А. ВОРОНИНА, зав. отд., НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»;
О. Ю. ГЛЕБОВ, ст. науч. сотр., НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»;
Г. М. КОЛИУШКО, зам. директора по научной работе,
НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ В КАБЕЛЯХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ НА ШИНАХ ПОДСТАНЦИИ С ЦЕЛЬЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

В статті наведено розрахункові схеми та математичні вирази щодо визначення рівнів електромагнітних завод в кабелях вимірювальних трансформаторів струму при короткому замиканні на шинах підстанцій з метою забезпечення електромагнітної сумісності енергетичних об'єктів.

For the purpose to provide the electromagnetic compatibility of substation, there are an analytical models and mathematical equations for determination of electromagnetic disturbance into current measuring transformer cables during short circuit on high-voltage buses are given in the paper.

Введение. Наиболее мощными источниками электромагнитных воздействий на открытых распределительных устройствах (ОРУ) электрических станций и подстанций являются короткие замыкания (КЗ) на шинах, прямой удар молнии или срабатывание ограничителей напряжения (ОПН) и разрядников. Общей особенностью указанных воздействий является стекание больших токов в заземляющее устройство (ЗУ), хотя формы импульсных токов, разумеется, существенно различаются. Однако, общая особенность этих воздействий позволяет разработать общую процедуру определения параметров электромагнитных помех в цепях релейных защит и автоматики (РЗА).

Целью данной работы является разработка процедуры определения параметров электромагнитных помех во вторичных цепях подстанций (ПС) на примере наиболее распространенных цепей РЗА – токовых цепей.

Известно, что для выполнения токовых цепей используют небронированные контрольные кабели. Токовые цепи заземляются в одной точке, которая может быть расположена как вблизи устройств РЗА (например, для дифференциальных защит шин), так и вблизи измерительного трансформатора тока (ТТ) (например, для токовых отсечек). Рабочий режим ТТ близок к режиму КЗ, то есть внутренне сопротивление ТТ значительно больше сопротивления нагрузки ТТ [1, 2]. Эти обстоятельства следует учитывать при выборе места измерения параметров помех.

Для любого из указанных воздействий и любого варианта заземления токовых цепей интерес представляет напряжение, прикладываемое к изоляции кабеля, а также ток, протекающий через токовое реле.

1. Помехи в токовых цепях

1.1 На рис. 1 приведена схема, поясняющая возникновение помех в токо-

вых цепях при протекании больших токов по ЗУ для случая заземления токовых цепей в клеммном ящике ТТ на ОРУ.

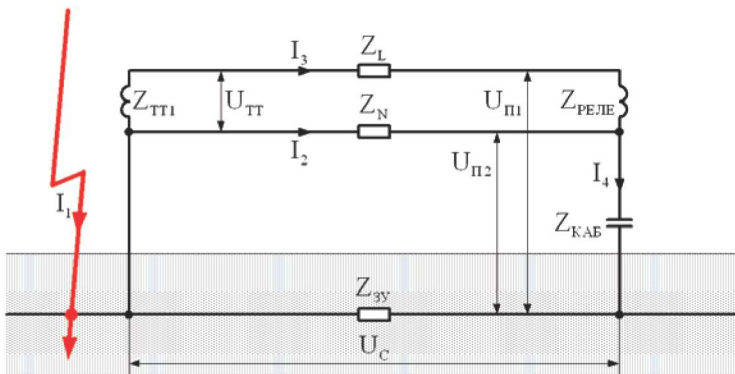


Рисунок 1 – Схема, поясняющая возникновение помех в токовых цепях

Эквивалентное сопротивление схемы Z_C определяется по формуле:

$$Z_C = \frac{Z_{ЗУ} \cdot Z_1}{Z_{ЗУ} + Z_1}, \quad (1)$$

где $Z_{ЗУ}$ – сопротивление связи по элементам ЗУ между клеммным ящиком ТТ и корпусом релейной панели; Z_1 – сопротивление токовых цепей, определяемое по формуле:

$$Z_1 = \frac{Z_N \cdot Z_2}{Z_N + Z_2} + Z_{КАБ}, \quad (2)$$

где Z_N – сопротивление нулевого провода кабеля ТТ; $Z_{КАБ}$ – емкостное сопротивление нулевого провода кабеля ТТ; Z_2 – сопротивление фазного участка токовых цепей, определяемое по формуле:

$$Z_2 = Z_{ТТ1} + Z_L + Z_{РЕЛЕ}, \quad (3)$$

где $Z_{ТТ1}$ – индуктивная составляющая сопротивления ТТ; Z_L – сопротивление фазного провода кабеля ТТ; $Z_{РЕЛЕ}$ – сопротивление реле (пускового органа защиты).

На высоких частотах индуктивные сопротивления $Z_{ТТ1}$ и $Z_{РЕЛЕ}$ значительно больше сопротивлений Z_L , кроме того, сопротивление $Z_{ТТ1}$ значительно больше сопротивления $Z_{РЕЛЕ}$ (поскольку ТТ работает в режиме, близком к режиму КЗ), поэтому сопротивлениями Z_L и $Z_{РЕЛЕ}$ можно пренебречь, тогда сопротивление Z_2 близко к сопротивлению $Z_{ТТ1}$. Большое сопротивление Z_2 шунтировано меньшим сопротивлением Z_N , поэтому сопротивление Z_1 близко к сумме сопротивлений Z_N и $Z_{КАБ}$, но шунтировано меньшим сопротивлением $Z_{ЗУ}$, следовательно, сопротивление Z_C близко к сопротивлению $Z_{ЗУ}$.

На низких частотах емкостное сопротивление $Z_{КАБ}$ значительно больше сопротивлений Z_N и Z_2 , поэтому сопротивлениями Z_N и Z_2 можно пренебречь,

тогда сопротивление Z_1 близко к сопротивлению $Z_{КАБ}$, но шунтировано меньшим сопротивлением $Z_{ЗУ}$, следовательно, сопротивление Z_C по-прежнему близко к сопротивлению $Z_{ЗУ}$.

Ток помехи I_4 , ответвляющийся с ЗУ в токовые цепи:

$$I_4 = U_C / Z_1, \quad (4)$$

где U_C – напряжение на эквивалентном сопротивлении схемы Z_C , обусловленное растеканием воздействующего тока I_1 .

Токи помехи I_2 в нулевом проводе и I_3 в реле:

$$I_2 = \frac{U_C - I_4 \cdot Z_{КАБ}}{Z_N} = U_C \left(1 - \frac{Z_{КАБ}}{Z_1} \right) \frac{1}{Z_N}; \quad (5)$$

$$I_3 = \frac{U_C - I_4 \cdot Z_{КАБ}}{Z_2} = U_C \left(1 - \frac{Z_{КАБ}}{Z_1} \right) \frac{1}{Z_2}. \quad (6)$$

На высоких частотах сопротивление Z_1 близко к сумме сопротивлений Z_N и $Z_{КАБ}$, а сопротивление Z_2 близко к сопротивлению $Z_{ТТ1}$, поэтому токи I_2 и I_3 зависят от соотношения сопротивлений Z_N и $Z_{КАБ}$:

$$I_2^{ВЧ} \approx \frac{U_C}{Z_N} \cdot \frac{Z_N}{(Z_N + Z_{КАБ})}; \quad I_3^{ВЧ} \approx \frac{U_C}{Z_{ТТ1}} \cdot \frac{Z_N}{(Z_N + Z_{КАБ})}. \quad (7)$$

Если сопротивление $Z_{КАБ}$ значительно больше сопротивления Z_N , то сопротивлением Z_N можно пренебречь, поэтому $I_2 \approx 0$, $I_3 \approx 0$. Если сопротивление $Z_{КАБ}$ значительно меньше сопротивления Z_N , то сопротивлением $Z_{КАБ}$ можно пренебречь, поэтому $I_2 \approx U_C / Z_N$, $I_3 \approx U_C / Z_{ТТ1}$.

На низких частотах сопротивление Z_1 близко к сопротивлению $Z_{КАБ}$, поэтому $I_2 \approx 0$, $I_3 \approx 0$.

Напряжения помехи $U_{П1}$ между фазным проводом и землей, $U_{П2}$ между нулевым проводом и землей, $U_{ТТ}$ на ТТ, $U_{РЕЛЕ}$ на реле:

$$U_{П1} = I_3 \cdot Z_{РЕЛЕ} + I_4 \cdot Z_{КАБ} = U_C \left[\frac{Z_{РЕЛЕ}}{Z_2} \left(1 - \frac{Z_{КАБ}}{Z_1} \right) + \frac{Z_{КАБ}}{Z_1} \right]; \quad (8)$$

$$U_{П2} = I_4 \cdot Z_{КАБ} = U_C \frac{Z_{КАБ}}{Z_1}; \quad (9)$$

$$U_{ТТ} = I_3 \cdot Z_{ТТ1} = U_C \frac{Z_{ТТ1}}{Z_2} \left(1 - \frac{Z_{КАБ}}{Z_1} \right); \quad (10)$$

$$U_{РЕЛЕ} = U_{П1} - U_{П2} = U_C \left(1 - \frac{Z_{КАБ}}{Z_1} \right) \frac{Z_{РЕЛЕ}}{Z_2}. \quad (11)$$

На высоких частотах сопротивление Z_1 близко к сумме сопротивлений Z_N и $Z_{КАБ}$, а сопротивление Z_2 близко к сопротивлению $Z_{ТТ1}$, поэтому $U_{РЕЛЕ} \approx 0$ (поскольку сопротивление $Z_{ТТ1}$ значительно больше сопротивления $Z_{РЕЛЕ}$), а напряжения $U_{П1}$, $U_{П2}$ и $U_{ТТ}$ зависят от соотношения сопротивлений Z_N и $Z_{КАБ}$:

$$U_{\Pi}^{BЧ} \approx U_C \frac{Z_{КАБ}}{Z_N + Z_{КАБ}}; \quad U_{\Pi 2}^{BЧ} \approx U_C \frac{Z_{КАБ}}{Z_N + Z_{КАБ}}; \quad U_{ТТ}^{BЧ} \approx U_C \frac{Z_N}{Z_N + Z_{КАБ}}. \quad (12)$$

Если сопротивление $Z_{КАБ}$ значительно больше сопротивления Z_N , то сопротивлением Z_N можно пренебречь, поэтому $U_{\Pi} \approx U_C$, $U_{\Pi 2} \approx U_C$, $U_{ТТ} \approx 0$. Если сопротивление $Z_{КАБ}$ значительно меньше сопротивления Z_N , то сопротивлением $Z_{КАБ}$ можно пренебречь, поэтому $U_{\Pi} \approx 0$, $U_{\Pi 2} \approx 0$, $U_{ТТ} \approx U_C$.

На низких частотах сопротивление Z_1 близко к сопротивлению $Z_{КАБ}$, поэтому $U_{\Pi} \approx U_C$, $U_{\Pi 2} \approx U_C$, $U_{ТТ} \approx 0$, $U_{РЕЛЕ} \approx 0$.

1.2 На рис. 2 приведена схема, поясняющая возникновение помех в токовых цепях при протекании больших токов по ЗУ для случая заземления токовых цепей в релейной панели.

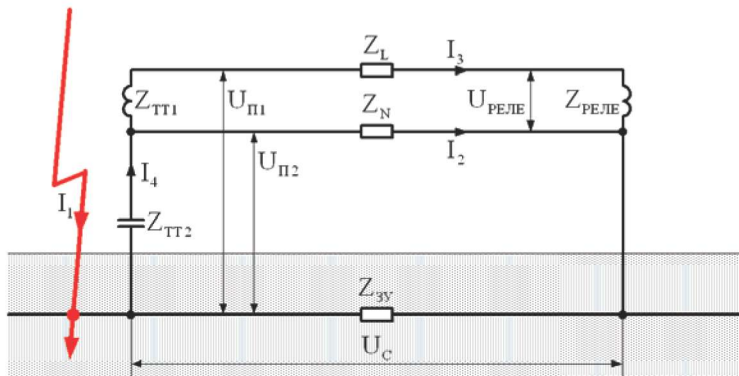


Рисунок 2 – Схема, поясняющая возникновение помех в токовых цепях

Эквивалентное сопротивление схемы Z_C определяется по формуле (1), но с учетом того, что сопротивление токовых цепей Z_1 определяется по формуле:

$$Z_1 = \frac{Z_N \cdot Z_2}{Z_N + Z_2} + Z_{ТТ2}, \quad (13)$$

где Z_N – сопротивление нулевого провода кабеля ТТ; $Z_{ТТ2}$ – емкостная составляющая сопротивления ТТ; Z_2 – сопротивление фазного участка токовых цепей, определяемое по формуле (3).

На высоких частотах сопротивление Z_2 близко к сопротивлению $Z_{ТТ1}$. Большое сопротивление Z_2 шунтировано меньшим сопротивлением Z_N , поэтому сопротивление Z_1 близко к сумме сопротивлений Z_N и $Z_{ТТ2}$, но шунтировано меньшим сопротивлением $Z_{ЗУ}$, следовательно, сопротивление Z_C близко к сопротивлению $Z_{ЗУ}$.

На низких частотах емкостное сопротивление $Z_{ТТ2}$ больше сопротивлений Z_N и Z_2 , поэтому сопротивление Z_1 близко к сопротивлению $Z_{ТТ2}$, но шунтировано меньшим сопротивлением $Z_{ЗУ}$, следовательно, сопротивление Z_C по-прежнему близко к сопротивлению $Z_{ЗУ}$.

Ток помехи I_4 , ответвляющийся с ЗУ в токовые цепи, определяется по формуле (4), но с учетом формулы (13).

Токи помехи I_2 в нулевом проводе и I_3 в реле:

$$I_2 = \frac{U_C - I_4 \cdot Z_{TT2}}{Z_N} = U_C \left(1 - \frac{Z_{TT2}}{Z_1} \right) \frac{1}{Z_N}; \quad (14)$$

$$I_3 = \frac{U_C - I_4 \cdot Z_{TT2}}{Z_2} = U_C \left(1 - \frac{Z_{TT2}}{Z_1} \right) \frac{1}{Z_2}. \quad (15)$$

На высоких частотах сопротивление Z_1 близко к сумме сопротивлений Z_N и Z_{TT2} , а сопротивление Z_2 близко к сопротивлению Z_{TT1} , поэтому токи I_2 и I_3 зависят от соотношения сопротивлений Z_N и Z_{TT2} :

$$I_2^{BЧ} \approx \frac{U_C}{Z_N} \cdot \frac{Z_N}{(Z_N + Z_{TT2})}; \quad I_3^{BЧ} \approx \frac{U_C}{Z_{TT1}} \cdot \frac{Z_N}{(Z_N + Z_{TT2})}. \quad (16)$$

Если сопротивление Z_{TT2} значительно больше сопротивления Z_N , то сопротивлением Z_N можно пренебречь, поэтому $I_2 \approx 0$, $I_3 \approx 0$. Если сопротивление Z_{TT2} значительно меньше сопротивления Z_N , то сопротивлением Z_{TT2} можно пренебречь, поэтому $I_2 \approx U_C/Z_N$, $I_3 \approx U_C/Z_{TT1}$.

На низких частотах сопротивление Z_1 близко к сопротивлению Z_{TT2} , поэтому $I_2 \approx 0$, $I_3 \approx 0$.

Напряжения помехи $U_{П1}$ между фазным проводом и землей, $U_{П2}$ между нулевым проводом и землей, $U_{ТТ}$ на ТТ, $U_{РЕЛЕ}$ на реле:

$$U_{П1} = I_3 \cdot Z_{TT1} + I_4 \cdot Z_{TT2} = U_C \left[\frac{Z_{TT1}}{Z_2} + \frac{Z_{TT2}}{Z_1} \left(1 - \frac{Z_{TT1}}{Z_2} \right) \right]; \quad (17)$$

$$U_{П2} = I_4 \cdot Z_{TT2} = U_C \frac{Z_{TT2}}{Z_1}; \quad (18)$$

$$U_{ТТ} = U_{П1} - U_{П2} = U_C \left(1 - \frac{Z_{TT2}}{Z_1} \right) \frac{Z_{TT1}}{Z_2}; \quad (19)$$

$$U_{РЕЛЕ} = I_3 \cdot Z_{РЕЛЕ} = U_C \frac{Z_{РЕЛЕ}}{Z_2} \left(1 - \frac{Z_{TT2}}{Z_1} \right). \quad (20)$$

На высоких частотах сопротивление Z_2 близко к сопротивлению Z_{TT1} , поэтому $U_{РЕЛЕ} \approx 0$ (поскольку $Z_{TT1} \gg Z_{РЕЛЕ}$), кроме того выражение в квадратных скобках формулы (17) близко к единице, следовательно, $U_{П1} \approx U_C$. Сопротивление Z_1 близко к сумме сопротивлений Z_N и Z_{TT2} , поэтому напряжения $U_{П2}$ и $U_{ТТ}$ зависят от соотношения сопротивлений Z_N и Z_{TT2} :

$$U_{П2}^{BЧ} \approx U_C \frac{Z_{TT2}}{Z_N + Z_{TT2}}; \quad U_{ТТ}^{BЧ} \approx U_C \frac{Z_N}{Z_N + Z_{TT2}}. \quad (21)$$

Если сопротивление Z_{TT2} значительно больше сопротивления Z_N , то сопротивлением Z_N можно пренебречь, поэтому $U_{П2} \approx U_C$, $U_{ТТ} \approx 0$. Если сопротивление Z_{TT2} значительно меньше сопротивления Z_N , то сопротивлением Z_{TT2}

можно пренебречь, поэтому $U_{П2} \approx 0$, $U_{ТТ} \approx U_C$.

На низких частотах сопротивление Z_1 близко к сопротивлению $Z_{ТТ2}$, поэтому $U_{П1} \approx U_C$, $U_{П2} \approx U_C$, $U_{ТТ} \approx 0$, $U_{РЕЛЕ} \approx 0$.

Таблица 1 – Помехи в токовых цепях, заземленных в клеммном ящике ТТ

Наименование параметра	Общая формула	ВЧ приближение		НЧ приближение
		$Z_{КАБ} \gg Z_N$	$Z_{КАБ} \ll Z_N$	
Ток помехи I_2	(5)	$I_2 \approx 0$	$I_2 \approx U_C / Z_N$	$I_2 \approx 0$
Ток помехи I_3	(6)	$I_3 \approx 0$	$I_3 \approx U_C / Z_{ТТ1}$	$I_3 \approx 0$
Напряжение помехи $U_{П1}$	(9)	$U_{П1} \approx U_C$	$U_{П1} \approx 0$	$U_{П1} \approx U_C$
Напряжение помехи $U_{П2}$	(10)	$U_{П2} \approx U_C$	$U_{П2} \approx 0$	$U_{П2} \approx U_C$
Напряжение помехи $U_{ТТ}$	(11)	$U_{ТТ} \approx 0$	$U_{ТТ} \approx U_C$	$U_{ТТ} \approx 0$
Напряжение помехи $U_{РЕЛЕ}$	(12)	$U_{РЕЛЕ} \approx 0$		$U_{РЕЛЕ} \approx 0$

Таблица 2 – Помехи в токовых цепях, заземленных в релейной панели

Наименование параметра	Общая формула	ВЧ приближение		НЧ приближение
		$Z_{ТТ2} \gg Z_N$	$Z_{ТТ2} \ll Z_N$	
Ток помехи I_2	(17)	$I_2 \approx 0$	$I_2 \approx U_C / Z_N$	$I_2 \approx 0$
Ток помехи I_3	(18)	$I_3 \approx 0$	$I_3 \approx U_C / Z_{ТТ1}$	$I_3 \approx 0$
Напряжение помехи $U_{П1}$	(21)	$U_{П1} \approx U_C$		$U_{П1} \approx U_C$
Напряжение помехи $U_{П2}$	(22)	$U_{П2} \approx U_C$	$U_{П2} \approx 0$	$U_{П2} \approx U_C$
Напряжение помехи $U_{ТТ}$	(23)	$U_{ТТ} \approx 0$	$U_{ТТ} \approx U_C$	$U_{ТТ} \approx 0$
Напряжение помехи $U_{РЕЛЕ}$	(24)	$U_{РЕЛЕ} \approx 0$		$U_{РЕЛЕ} \approx 0$

Выводы по п.1. В табл. 1 и 2 приведены высокочастотные и низкочастотные приближения токов помех I_2 и I_3 , а также напряжений помех $U_{ТТ}$, $U_{П1}$, $U_{П2}$ и $U_{РЕЛЕ}$ в случае заземления токовых цепей в клеммном ящике ТТ – табл. 1, в случае заземления токовых цепей в релейной панели – табл. 2. Сравнительный анализ данных, приведенных в табл. 1 и 2, позволяет сделать следующие выводы.

Параметры помех на высоких и низких частотах определяются параметрами токовых цепей и напряжением U_C . Напряжение U_C определяется воздействующим током (точнее той его частью, которая ответвляется в эквивалентное сопротивление схемы Z_C). Поэтому, выполнив измерения напряжения U_C (при имитации воздействующих токов в некотором масштабе по амплитуде, но с сохранением формы тока) и зная параметры токовых цепей, можно определить искомые параметры электромагнитных помех.

Высокочастотные и низкочастотные приближения позволяют выполнить оценку параметров помех «сверху», то есть дают несколько завышенные значения, что обеспечивает некоторый запас при разработке рекомендаций по уменьшению помех. Погрешность оценки зависит от того, на сколько эквивалентное сопротивление схемы Z_C отличается от сопротивления связи $Z_{ЗУ}$, то есть на сколько сопротивление связи $Z_{ЗУ}$ отличается от сопротивления токо-

вых цепей Z_1 . Причем, чем меньше сопротивление Z_{3y} по отношению к сопротивлению Z_1 , тем ближе сопротивление Z_C к сопротивлению Z_{3y} и, следовательно, меньше погрешность оценки параметров помех.

Сопротивление связи Z_{3y} значительно меньше сопротивления токовых цепей Z_1 на высоких и низких частотах. Следовательно, в токовые цепи отводится не значительная часть воздействующего тока (ток КЗ или ток молнии), поэтому токи помех I_2 и I_3 не достаточны для ложного срабатывания реле и не оказывают существенного термического воздействия на проводники и изоляцию кабеля.

На низких частотах сопротивление связи Z_{3y} мало, поэтому напряжения помех $U_{\Pi 1}$ и $U_{\Pi 2}$, которые хоть и могут достигать сотен вольт при КЗ на шинах ПС, но все же не представляют опасности для изоляции кабеля.

На высоких частотах существенно возрастает индуктивная составляющая сопротивления связи Z_{3y} , поэтому напряжение U_C , а значит и напряжения помех $U_{\Pi 1}$, $U_{\Pi 2}$ и U_{TT} (в зависимости от соотношения сопротивлений $Z_{КАБ}$ и Z_N , Z_{TT2} и Z_N) могут достигать при ударе молнии нескольких десятков киловольт, следовательно, напряжения помех представляют опасность для изоляции кабеля. Напряжения помех $U_{\Pi 1}$ и $U_{\Pi 2}$ представляют опасность для изоляции с той стороны кабеля, где не выполняется заземление токовых цепей.

Выполнение условий $Z_{КАБ} \ll Z_N$ и $Z_{TT2} \ll Z_N$ на высоких частотах эквивалентно заземлению токовых цепей с двух сторон. Этого можно достичь, установив конденсаторы параллельно емкостным сопротивлениям кабеля и ТТ $Z_{КАБ}$ и Z_{TT2} . При этом происходит перераспределение напряжений помех, то есть какие-то напряжения помех становятся меньше, но какие-то – больше. Поэтому, для уменьшения напряжений помех таким способом следует, очевидно, добиваться равенства сопротивлений $Z_{КАБ} = Z_N$ или $Z_{TT2} = Z_N$, что приведет к выравниванию напряжений помех (напряжения помех станут равны). Таким образом, благодаря установке дополнительного конденсатора, можно уменьшить напряжения помех не более чем в два раза по отношению к напряжению U_C . При этом следует помнить, что установленные конденсаторы будут влиять на переходные процессы в нормальном режиме работы токовых цепей.

Поскольку индуктивная составляющая Z_{TT1} сопротивления ТТ значительно больше сопротивления реле $Z_{РЕЛЕ}$ (ТТ работает в режиме, близком к режиму короткого замыкания), то напряжение помехи на реле $U_{РЕЛЕ}$ на высоких и низких частотах близко к нулю для любого варианта заземления токовых цепей и не зависит от соотношения сопротивлений $Z_{КАБ}$ и Z_N , Z_{TT2} и Z_N .

Если напряжение помех превысит электрическую прочность изоляции, то произойдет КЗ в кабеле. Однако, авторам статьи не удалось найти каких-либо справочных данных о пределах электрической прочности изоляции контрольных кабелей к высокочастотным (импульсным) напряжениям. Нормы испытаний не предусматривают испытание изоляции контрольных кабелей высокочастотными или импульсными напряжениями. В связи с этим приходится ориентироваться на требования нормативных документов по электромагнитной совместимости, которые рекомендуют [3] ограничить напряжения помех в

сигнальных портах технических средств на уровне: 1 кВ – в случае дальнего удара молнии и ВЧ колебательных переходных процессов в диапазоне частот 0,5–5 МГц; 2 кВ – в случае ближнего удара молнии и ВЧ колебательных переходных процессов в диапазоне частот 5–500 кГц.

Напряжения помех будут наибольшими в том случае, когда действующий ток (ток КЗ или ток молнии) втекает в ЗУ в непосредственной близости от места заземления токовых цепей, то есть от клеммного ящика ТТ (поскольку воздействующие токи, как правило, не могут втекать в ЗУ вблизи релейных панелей). Радиус зоны растекания импульсных токов по ЗУ, как правило, не превышает 30 – 40 метров, то есть эти токи не достигают релейных панелей (на ПС с протяженными ОРУ, то есть с длинными кабелями). В таком случае напряжения помех будут близки к импульсному напряжению на ЗУ (напряжение на ЗУ, обусловленное стеканием импульсного тока), что позволяет заменить измерение напряжения U_C на измерение импульсного напряжения на ЗУ или на измерение так называемого импульсного сопротивления. Таким образом, для уменьшения импульсных (высокочастотных) напряжений помех необходимо уменьшать так называемое импульсное сопротивление ЗУ, для чего необходимо, например, устанавливать вертикальные заземлители вблизи клеммных ящиков ТТ.

2. Помехи в токовых цепях с замкнутым на землю нулевым проводом. На рис. 3 приведены схемы, поясняющие возникновение помех в токовых цепях с замкнутым на землю нулевым проводом при протекании больших токов по ЗУ. Это возможно, когда высокочастотное напряжение помех $U_{П2}$ (см. п.1) между нулевым проводом и землей превысит предел электрической прочности изоляции кабеля. Такой случай замыкания в кабеле подобен установке устройства защиты от импульсных помех (УЗИП) только между нулевым проводом и землей на той стороне кабеля, где не заземляются токовые цепи. В данном случае представляют интерес значения низкочастотных токов, протекающих по проводам кабеля и по реле.

Эквивалентное сопротивление схемы Z_C (для любого варианта заземления токовых цепей) определяется по формуле (1), но с учетом того, что сопротивление токовых цепей Z_1 определяется по формуле:

$$Z_1 = \frac{Z_N \cdot Z_2}{Z_N + Z_2}, \quad (22)$$

где Z_N – сопротивление нулевого провода кабеля ТТ; Z_2 – сопротивление фазного участка токовых цепей, определяемое по формуле (3).

На низких частотах сопротивление Z_2 мало и шунтировано меньшим сопротивлением Z_N , поэтому сопротивление Z_1 мало, но шунтировано еще меньшим сопротивлением $Z_{ЗУ}$, следовательно, сопротивление Z_C мало и близко к сопротивлению параллельно соединенных сопротивлений Z_N и $Z_{ЗУ}$.

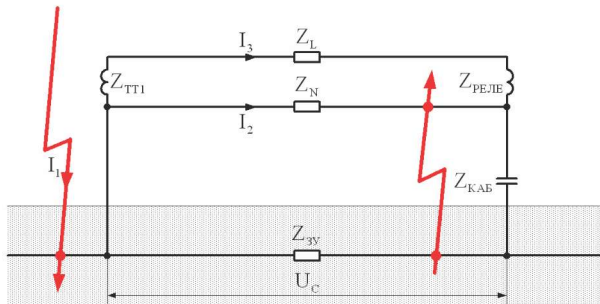
Токи помехи I_2 в нулевом проводе и I_3 в реле:

$$I_2 = \frac{U_C}{Z_N}; \quad (23)$$

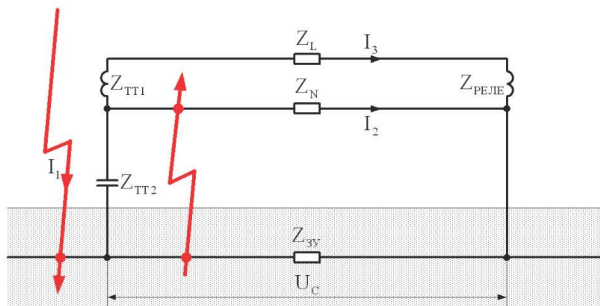
$$I_3 = \frac{U_c}{Z_2} = \frac{U_c}{Z_{\text{ТТ1}} + Z_L + Z_{\text{РЕЛЕ}}} . \quad (24)$$

На низких частотах сопротивление Z_N мало, поэтому ток I_2 может оказывать опасное термическое воздействие на проводник и изоляцию кабеля. Сопротивление Z_2 близко к сопротивлению $Z_{\text{ТТ1}}$, поэтому ток I_3 не может вызвать срабатывание реле, поскольку сопротивление $Z_{\text{ТТ1}}$ значительно больше сопротивления $Z_{\text{РЕЛЕ}}$:

$$I_2^{\text{НЧ}} = U_c / Z_N ; \quad I_3^{\text{НЧ}} \approx U_c / Z_{\text{ТТ1}} . \quad (25)$$



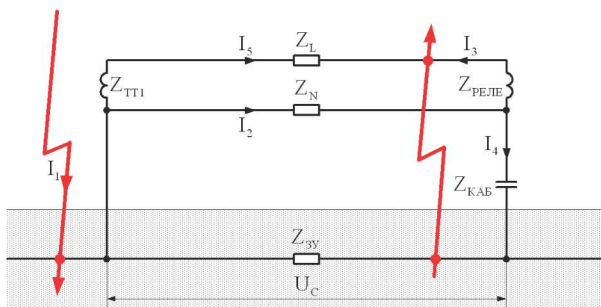
а – токовые цепи заземлены в клеммном ящике ТТ



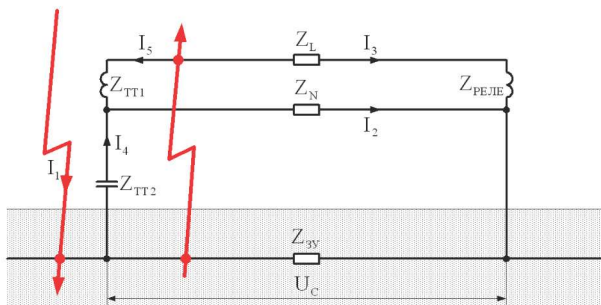
б – токовые цепи заземлены в релейной панели

Рисунок 3

3. Помехи в токовых цепях с замкнутым на землю фазным проводом кабеля. На рис. 4 приведены схемы, поясняющие возникновение помех в токовых цепях с замкнутым на землю фазным проводом при протекании больших токов по ЗУ. Это возможно, когда высокочастотное напряжение помех $U_{\text{П}}$ (см. п.1) между фазным проводом и землей превысит предел электрической прочности изоляции кабеля. Такой случай замыкания в кабеле подобен установке УЗИП только между фазным проводом и землей на той стороне кабеля, где не заземляются токовые цепи. В данном случае также представляют интерес значения низкочастотных токов, протекающих по проводам кабеля и по реле.



a – токовые цепи заземлены в клеммном ящике ТТ



б – токовые цепи заземлены в релейной панели

Рисунок 4

3.1 Эквивалентное сопротивление схемы Z_C , в которой токовые цепи заземлены в клеммном ящике (см. рис. 4, *a*), определяется по формуле (1), но с учетом того, что сопротивление токовых цепей Z_1 определяется по формуле:

$$Z_1 = \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3}, \quad (26)$$

где Z_2 и Z_3 – сопротивления фазного и нулевого участков токовых цепей соответственно, определяемые по формулам:

$$Z_2 = Z_{ТТ1} + Z_L; \quad (27)$$

$$Z_3 = Z_N + \frac{Z_{РЕЛЕ} \cdot Z_{КАБ}}{Z_{РЕЛЕ} + Z_{КАБ}}, \quad (28)$$

где $Z_{ТТ1}$ – индуктивная составляющая сопротивления ТТ; Z_L – сопротивление фазного провода кабеля ТТ; Z_N – сопротивление нулевого провода кабеля ТТ; $Z_{КАБ}$ – емкостное сопротивление нулевого провода кабеля ТТ; $Z_{РЕЛЕ}$ – сопротивление реле (пускового органа защиты).

На низких частотах сопротивление $Z_{КАБ}$ больше сопротивлений Z_N и $Z_{РЕЛЕ}$, из которых большим является сопротивление $Z_{РЕЛЕ}$, поэтому сопротивление Z_3 близко к сопротивлению $Z_{РЕЛЕ}$. Сопротивление $Z_{ТТ1}$ больше сопро-

тивления Z_L , поэтому сопротивление Z_2 близко к сопротивлению $Z_{ТТ1}$. Сопротивление Z_1 определяется сопротивлением параллельно включенных сопротивлений $Z_{ТТ1}$ и $Z_{РЕЛЕ}$, из которых большим является сопротивление $Z_{ТТ1}$, поэтому сопротивление Z_1 близко к сопротивлению $Z_{ТТ1}$, но шунтировано меньшим сопротивлением $Z_{ЗУ}$, следовательно сопротивление Z_C близко к сопротивлению $Z_{ЗУ}$.

Токи помехи I_2 в нулевом проводе и I_3 в реле:

$$I_2 = U_C / Z_3 ; \quad (29)$$

$$I_3 = \frac{U_C - I_2 \cdot Z_N}{Z_{РЕЛЕ}} = \frac{U_C}{Z_{РЕЛЕ}} \left(1 - \frac{Z_N}{Z_3} \right). \quad (30)$$

На низких частотах сопротивление Z_3 близко к сопротивлению $Z_{РЕЛЕ}$, поэтому токи I_2 и I_3 близки друг к другу и не могут оказывать опасное термическое воздействие на изоляцию кабеля, но могут вызвать срабатывание реле:

$$I_2^{НЧ} \approx \frac{U_C}{Z_{РЕЛЕ}} ; \quad I_3^{НЧ} \approx \frac{U_C}{Z_{РЕЛЕ}}. \quad (31)$$

3.2 Эквивалентное сопротивление схемы Z_C , в которой токовые цепи заземлены в релейной панели (см. рис. 4-б), определяется по формуле (1), но с учетом того, что сопротивление токовых цепей Z_1 определяется по формуле (25), в которой сопротивления фазного и нулевого участков токовых цепей определяются по формулам:

$$Z_2 = Z_{РЕЛЕ} + Z_L ; \quad (32)$$

$$Z_3 = Z_N + \frac{Z_{ТТ1} \cdot Z_{ТТ2}}{Z_{ТТ1} + Z_{ТТ2}}, \quad (33)$$

где $Z_{ТТ1}$ – индуктивная составляющая сопротивления ТТ; Z_L – сопротивление фазного провода кабеля ТТ; Z_N – сопротивление нулевого провода кабеля ТТ; $Z_{ТТ2}$ – емкостная составляющая сопротивления ТТ; $Z_{РЕЛЕ}$ – сопротивление реле (пускового органа защиты).

На низких частотах сопротивление $Z_{ТТ2}$ больше сопротивлений Z_N и $Z_{ТТ1}$, из которых большим является сопротивление $Z_{ТТ1}$, поэтому сопротивление Z_3 близко к сопротивлению $Z_{ТТ1}$. Сопротивление $Z_{РЕЛЕ}$ больше сопротивления Z_L , поэтому сопротивление Z_2 близко к сопротивлению $Z_{РЕЛЕ}$. Сопротивление Z_1 определяется сопротивлением параллельно включенных сопротивлений $Z_{ТТ1}$ и $Z_{РЕЛЕ}$, из которых большим является сопротивление $Z_{ТТ1}$, поэтому сопротивление Z_1 близко к сопротивлению $Z_{ТТ1}$, но шунтировано меньшим сопротивлением $Z_{ЗУ}$, следовательно сопротивление Z_C близко к сопротивлению $Z_{ЗУ}$.

Ток помехи I_2 в нулевом проводе определяется по формуле (29), но с учетом формулы (33). Ток помехи I_3 в реле:

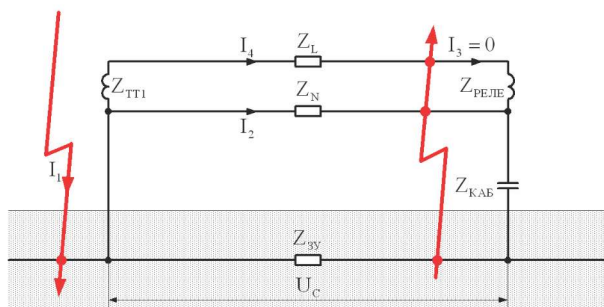
$$I_3 = U_C / Z_2 . \quad (34)$$

На низких частотах сопротивление Z_3 близко к сопротивлению $Z_{ТТ1}$, а сопротивление Z_2 близко к сопротивлению $Z_{РЕЛЕ}$, поэтому ток I_2 не может оказы-

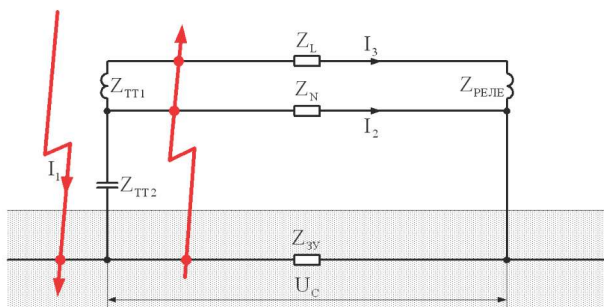
вать опасное термическое воздействие на изоляцию кабеля, но ток I_3 может вызвать срабатывание реле:

$$I_2^{\text{нч}} \approx \frac{U_c}{Z_{\text{ТТ1}}}; \quad I_3^{\text{нч}} \approx \frac{U_c}{Z_{\text{РЕЛЕ}}}. \quad (35)$$

4. Помехи в токовых цепях с замкнутыми на землю фазным и нулевым проводами кабеля. На рис. 5 приведены схемы, поясняющие возникновение помех в токовых цепях с замкнутыми на землю фазным и нулевым проводами кабеля при протекании больших токов по ЗУ. Это возможно, когда высокочастотные напряжения помех $U_{\text{П1}}$ и $U_{\text{П2}}$ (см. п.1) превысят предел электрической прочности изоляции кабеля. Такой случай замыкания в кабеле подобен установке УЗИП как между нулевым проводом и землей, так и между фазным проводом и землей на той стороне кабеля, где не заземляются токовые цепи. По-прежнему представляют интерес значения низкочастотных токов, протекающих по проводам кабеля и по реле.



a – токовые цепи заземлены в клеммном ящике ТТ



б – токовые цепи заземлены в релейной панели

Рисунок 5

4.1 Эквивалентное сопротивление схемы Z_c , в которой токовые цепи заземлены в клеммном ящике (см. рис. 5, *a*), определяется по формуле (1), но с

учетом того, что сопротивление токовых цепей Z_1 определяется по формуле:

$$Z_1 = \frac{Z_N \cdot Z_2}{Z_N + Z_2}, \quad (36)$$

где Z_N – сопротивление нулевого провода кабеля ТТ; Z_2 – сопротивление фазного участка токовых цепей, определяемое по формуле:

$$Z_2 = Z_{\text{ТТ1}} + Z_L; \quad (37)$$

где $Z_{\text{ТТ1}}$ – индуктивная составляющая сопротивления ТТ; Z_L – сопротивление фазного провода кабеля ТТ.

На низких частотах индуктивное сопротивление $Z_{\text{ТТ1}}$ больше сопротивлений Z_L и Z_N , поэтому сопротивление Z_2 близко к сопротивлению $Z_{\text{ТТ1}}$, но шунтировано сопротивлением Z_N , следовательно сопротивление Z_1 близко к сопротивлению Z_N , тогда сопротивление Z_C близко к сопротивлению параллельно соединенных сопротивлений Z_N и $Z_{\text{ЗУ}}$.

Ток помехи I_2 в нулевом проводе:

$$I_2 = U_C / Z_N. \quad (38)$$

На низких частотах сопротивление Z_N мало, поэтому ток I_2 может оказывать опасное термическое воздействие на проводник и изоляцию этого кабеля.

В реле в данном случае не протекает никакой ток ($I_3 = 0$).

4.2 Эквивалентное сопротивление схемы Z_C , в которой токовые цепи заземлены в релейной панели (см. рис. 5, б), определяется по формуле (1), но с учетом того, что сопротивление токовых цепей Z_1 определяется по формуле (36), в которой сопротивление фазного участка токовых цепей Z_2 определяется по формуле:

$$Z_2 = Z_{\text{РЕЛЕ}} + Z_L, \quad (39)$$

где $Z_{\text{РЕЛЕ}}$ – сопротивление реле (пускового органа защиты); Z_L – сопротивление фазного провода кабеля ТТ.

На низких частотах индуктивное сопротивление $Z_{\text{РЕЛЕ}}$ больше сопротивлений Z_L и Z_N , поэтому сопротивление Z_2 близко к сопротивлению $Z_{\text{РЕЛЕ}}$, но шунтировано сопротивлением Z_N , следовательно сопротивление Z_1 близко к сопротивлению Z_N , тогда сопротивление Z_C близко к сопротивлению параллельно соединенных сопротивлений Z_N и $Z_{\text{ЗУ}}$.

Ток помехи I_2 в нулевом проводе определяется по формуле (38). Ток помехи I_3 в реле:

$$I_3 = \frac{U_C}{Z_2} = \frac{U_C}{Z_L + Z_{\text{РЕЛЕ}}}. \quad (40)$$

На низких частотах сопротивление Z_N мало, поэтому ток I_2 может оказывать опасное термическое воздействие на проводник и изоляцию этого кабеля. Сопротивление Z_2 близко к сопротивлению $Z_{\text{РЕЛЕ}}$, поэтому ток I_3 может вызвать срабатывание реле:

$$I_2^{\text{НЧ}} = \frac{U_C}{Z_N}; \quad I_3^{\text{НЧ}} \approx \frac{U_C}{Z_{\text{РЕЛЕ}}}. \quad (41)$$

Таблица 3 – Токи помех в токовых цепях с замкнутыми проводами кабеля

Схема		НЧ приближение	
		ток помехи I_2	ток помехи I_3
Замкнут на землю нулевой провод	цепи заземлены в клеммном ящике ТТ (рис. 3, а)	$I_2 \approx U_C/Z_N$	$I_3 \approx U_C/Z_{\text{ТТ1}}$
	цепи заземлены в релейной панели (рис. 3, б)	$I_2 \approx U_C/Z_N$	$I_3 \approx U_C/Z_{\text{ТТ1}}$
Замкнут на землю фазный провод	цепи заземлены в клеммном ящике ТТ (рис. 4, а)	$I_2 \approx U_C/Z_{\text{РЕЛЕ}}$	$I_3 \approx U_C/Z_{\text{РЕЛЕ}}$
	цепи заземлены в релейной панели (рис. 4, б)	$I_2 \approx U_C/Z_{\text{ТТ1}}$	$I_3 \approx U_C/Z_{\text{РЕЛЕ}}$
Замкнуты на землю два провода	цепи заземлены в клеммном ящике ТТ (рис. 5, а)	$I_2 \approx U_C/Z_N$	$I_3 \approx 0$
	цепи заземлены в релейной панели (рис. 5, б)	$I_2 \approx U_C/Z_N$	$I_3 \approx U_C/Z_{\text{РЕЛЕ}}$

Выводы по пп. 2 – 4. В таблице 3 приведены низкочастотные приближения токов помех I_2 и I_3 в токовых цепях в различных вариантах короткого замыкания в кабеле. Сравнительный анализ данных, приведенных в таблице 3, позволяет сделать следующие выводы.

При замыкании одного или двух проводов кабеля не зависимо от места заземления токовых цепей, ток помехи в фазном проводе (в табл. 3 не показан), не вызывает обрыв фазного провода и термическое повреждение изоляции кабеля.

При замыкании на землю только нулевого провода кабеля (см. рис. 3) независимо от места заземления токовых цепей, ток помехи I_2 может вызвать обрыв нулевого провода и/или термическое повреждение его изоляции, но ток помехи I_3 не может вызвать срабатывание реле.

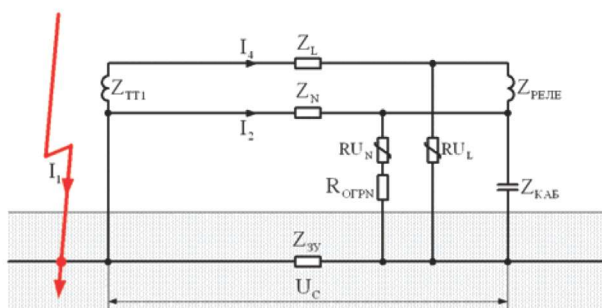
При замыкании на землю только фазного провода кабеля (см. рис. 4) независимо от места заземления токовых цепей, ток помехи I_2 наоборот не может вызвать обрыв нулевого провода и/или термическое повреждение его изоляции, но ток помехи I_3 может вызвать срабатывание реле.

При замыкании на землю нулевого и фазного проводов кабеля (см. рис. 5) ток помехи I_2 может вызвать обрыв нулевого провода и/или термическое повреждение его изоляции независимо от места заземления токовых цепей, а ток помехи I_3 может вызвать срабатывание реле в случае заземления токовых цепей в релейной панели.

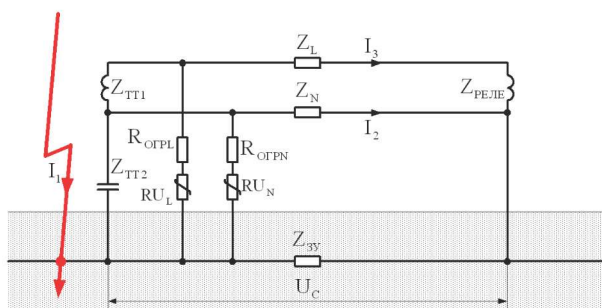
Замыкание на землю нулевого и фазного проводов кабеля (см. рис. 5) подобно установке УЗИП (например, варисторов) на той стороне кабеля, где не

заземляются токовые цепи. Однако, при срабатывании таких устройств следует ограничить токи помех, протекающие по нулевому проводу и реле, поскольку ток, протекающий по нулевому проводу, может вызвать обрыв этого провода, вследствие чего вторичная обмотка ТТ разомкнется.

Известно, что размыкание вторичной обмотки приводит к исчезновению размагничивающего действия вторичного тока, и тогда весь первичный ток становится током намагничивания. В этом режиме резко возрастает магнитная индукция в стали магнитопровода, во много раз увеличиваются активные потери в стали, что приводит к ее перегреву, обгоранию изоляции обмотки и, в конечном счете, – к повреждению ТТ. Кроме того, большой магнитный поток наводит во вторичной обмотке значительную ЭДС, которая может достигнуть десятков киловольт, что представляет опасность как для обслуживающего персонала, так и для изоляции вторичных цепей [1].



а – токовые цепи заземлены в клеммном ящике ТТ



б – токовые цепи заземлены в релейной панели

Рисунок 6

Для ограничения токов помех можно последовательно с УЗИП установить ограничивающие резисторы. На рис. 6 приведены схемы токовых цепей с УЗИП (варисторы RU_N и RU_L), предназначенными для защиты токовых цепей от высокочастотных перенапряжений. Для ограничения тока в нулевом прово-

де при срабатывании варистора RU_N (независимо от места заземления токовых цепей) последовательно варистору установлен резистор $R_{огрN}$. Для ограничения тока в реле при срабатывании варистора RU_L в случае заземления токовых цепей в релейной панели последовательно варистору установлен резистор $R_{огрL}$. Сопротивление ограничивающих резисторов можно определить по формулам:

$$R_{огрN} = 1,1 \cdot \frac{U_c}{I_{терм}}; \quad (42)$$

$$R_{огрL} = 1,1 \cdot \left(\frac{U_c}{I_{уст}} - Z_{реле} \right), \quad (43)$$

где $I_{терм}$ – допустимый по термической стойкости ток нулевого провода; $I_{уст}$ – ток уставки реле; 1,1 – коэффициент запаса (запас 10 %).

Сопротивления ограничивающих резисторов составят единицы или десятки Ом. Сопротивление варисторов в закрытом состоянии значительно больше сопротивлений ограничивающих резисторов, поэтому высокочастотные напряжения помех $U_{п1}$ и $U_{п2}$ (см. п.1) будут приложены к варисторам и вызовут их срабатывание. Сопротивление варисторов в открытом состоянии значительно меньше сопротивлений ограничивающих резисторов, поэтому напряжения помех $U_{п1}$ и $U_{п2}$ приложатся к ограничивающим резисторам и варисторы закроются, вследствие чего напряжения помех $U_{п1}$ и $U_{п2}$ снова приложатся к варисторам. Так будет продолжаться до тех пор, пока не исчезнут напряжения помех $U_{п1}$ и $U_{п2}$, а точнее причины их появления.

Список литературы: 1. Трансформаторы тока / В. В. Афанасьев, Н. М. Адоньев, Л. В. Жалалис и др. – Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1980. 2. С.И. Лезнов, А.Л. Фаерман Устройство и обслуживание вторичных цепей электроустановок / под ред. М.Д. Кучкина. – М.: Энергия, 1979. 3. IEC/TS 61000-6-5:2001 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 6-5: Generic standards – Immunity for power station and substation environments (МЭК 61000-6-5:2001 Электромагнитная совместимость (ЭМС) – Часть 6-5: Общие стандарты – Помехоустойчивость технических средств, применяемых на электростанциях и подстанциях).

Поступила в редколлегию 15.03.2011